

# 3상 4선식 전력계통에서 중성선 전류 제거를 위한 50kVA급 저가형 능동전력필터

장민수\*, 최세완\*, 강창원\*\*  
\*서울산업대학교, \*\*피에스디테크

## A Low-Cost 50kVA Active Power Filter to Suppress Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire System

M.S. Jang\*, S.W. Choi\*, and C.W. Kang\*\*  
\*Seoul National University of Technology, \*\*PSD Tech

### ABSTRACT

최근 상업용 빌딩, 주거용 빌딩 및 공장등의 저전압 3상 4선식 배전계통에서 PC, UPS, 정류기기, 조명장치 및 사무용기기등 비선형 부하의 사용이 증가하고 있으며, 이로 인한 과도한 중성선 전류는 중성선의 고장, 변압기의 과열 및 중성선과 접지사이의 전압강하등 심각한 문제를 야기시키고 있다.

본 논문에서는 3상 4선식 배전계통에서 중성선 전류 저감을 위한 새로운 능동전력필터를 제안한다. 제안한 방식은 제어가 간단하고 부하용량대비 인버터등 장치의 용량이 작아 저가적으로 실현할 수 있다. 제안한 시스템은 이론적인 분석과 모의실험 및 실험에 의하여 그 타당성을 입증한다.

조과 제거용 능동전력필터가 제안되었다<sup>[4,5]</sup>. 이러한 방식은 수동방식[2]과는 달리 변압기를 낮은 영상 성분 임피던스를 갖도록 특별히 설계할 필요가 없으므로 변압기의 크기가 작아지며, 중성선전류 제거특성이 시스템 임피던스에 영향을 받지 않아 90%이상의 높은 제거율을 갖는다. 또한 제어가 간단하고 인버터부와 변압기부의 소형화가 가능하여 저가격화할 수 있다.

본 논문에서는 3상 4선식 배전계통에서 중성선 고조파전류 저감을 위한 새로운 저가형 능동전력필터의 제어특성을 분석하고 50kVA급의 시작품의 설계 및 실험을 통하여 본 방식의 타당성을 입증하고자 한다.

### 2. 제안한 방식의 능동전력필터

#### 1. 서 론

상업용 빌딩등의 저전압 3상 4선식 배전계통에 사용되는 PC, UPS, 정류기기, 조명장치 및 사무용기기등 비선형(nonlinear) 부하가 점점 증가하는 추세에 있으며 이로 인한 과도한 중성선 전류는 중성선의 고장, 변압기의 과열 및 중성선과 접지사이의 전압강하등 심각한 문제를 야기시킨다<sup>[6]</sup>.

이러한 중성선 전류를 감소시키기 위한 상품화가 완료된 방식으로서 각 상과 중성선에 지그재그 변압기를 연결하는 방식<sup>[2]</sup>은 영상성분(zero-sequence component) 임피던스가 작게 되도록 지그재그 변압기를 설계하여 부하에서 발생한 3조파의 영상성분 전류를 지그재그 변압기로 순환시켜 전원측으로 흐르는 중성선의 고조파전류를 제거한다. 그러나, 이 방식은 중성선전류 제거율이 시스템 임피던스에 영향을 받으며 영상성분에 대한 임피던스를 작게 하도록 하기 위하여 변압기의 크기가 커지는 문제가 있다.

이러한 문제점을 보완할 수 있는 중성선 전류 고

#### 2.1 동작원리

그림 1은 제안한 능동전력필터 시스템의 주전력 회로이다. 중성선에 직렬로 단상 PWM 인버터가 연결되며 각상과 중성선 사이에는 지그재그 변압기가 연결된다. 인버터에 필요한 dc 전압은 저용량의 변압기와 다이오드 정류기를 통하여 얻는다. 인버터 출력측에 병렬로 연결된 바이패스 스위치는 인버터 고장시 동작한다.

제안한 주회로를 위한 제어 블록도는 그림2와 같다. 이는 크게 전류제어와 전압제어 두부분으로 나뉘어지는데 전류제어는 부하 불평형에 의해 발생한 기본파 전류를 전원측 중성선으로 흐르게 하기 위한 것이고, 전압제어는 비선형 부하에 의해 발생하는 영상성분의 고조파를 중성선에 흐르지 못하게 하기위한 것이다.

부하측 중성선 전류  $i_{nL}$ 를 60Hz 밴드패스필터로 고조파 성분을 제거하여  $i_{nL,f}$ 를 얻고 전원측 중성선 전류  $i_{ns}$ 를 60Hz 밴드패스 필터로 고조파 성분을 제거하여  $i_{ns,f}$ 를 얻는다.

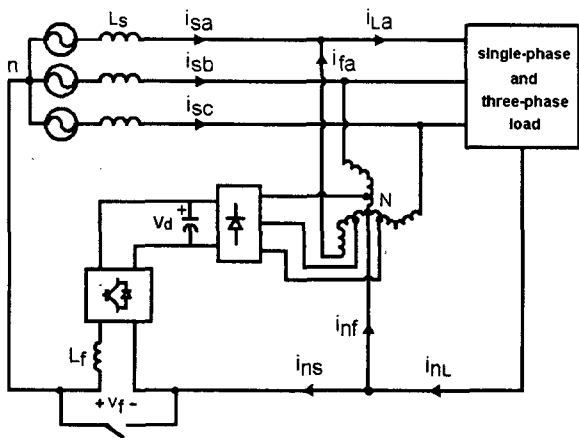


그림 1 제안한 능동전력필터 시스템

이 두 전류의 차 성분을 구함으로서 전원측 중성선 전류의 오차를 구할 수 있다. 이 오차 신호는 보상기  $G_f$ 를 통해 전류제어의 신호( $V_i$ )가 된다.

또한 전원측 중성선전류  $i_{ns}$ 를 60Hz Notch 필터로 기본파를 제거하여  $i_{ns,h}$ 를 얻고  $K_h$ 를 곱해서  $V_f$  양단에 고조파에 대한 전압을 발생하게 한다.

이때 60Hz 밴드패스 필터의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{\omega_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (1)$$

또한 60Hz Notch 필터의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_N = 1 - G(s) \quad (2)$$

여기서  $\omega_0$ 는 전원의 각 주파수,  $Q$ 는 선택도임.

이 두신호  $V_i$ 와  $V_v$ 는 더해지고, 인버터 스위치의 PWM동작을 위해 삼각파 캐리어 신호와 비교되어진다. 삼각파 신호의 최대값을  $A_T$ , 인버터 dc 전압을  $V_d$ , 제어기의 게인을  $K_h$ 라고 가정했을 때 인버터에 의해 발생하는  $V_f$  양단의 임피던스  $K$ 는 다음과 같다.

$$K = \frac{V_d \times K_h}{A_T} \quad (3)$$

인덕터  $L_f$ 는 인버터의 PWM 동작에 의해 발생하는 스위칭 리플을 제안하도록 설계된다.

여기서 시스템 정수를 다음과 같이 정한다.

- $V_{pu} = 220V$
- $P_{pu} = 16.6kVA$
- $Z_{pu} = 7.2\Omega$
- $Z_s = 0.02pu (0.144\Omega, L_s=0.4mH)$

다음으로는 그림 1로부터 전압원 부하, 전류원 부하에 대해 그림2에서 보듯이 전압제어와, 전류제어의 해석 및 보상특성을 알아보도록 한다.

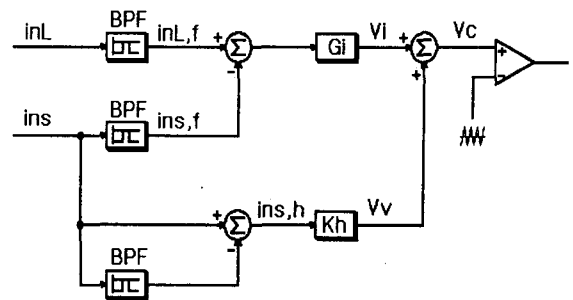


그림 2 제어블록도

### 2.1.1 전류원 부하

#### a) 고조파 성분에 대한 전압제어

전압제어를 위한 그림 1의 영상성분에 대한 단상 등가회로는 그림 3과 같다. 그림 3에서  $Z_s$ 는 전원 임피던스,  $Z_z$ 는 지그재그 변압기의 임피던스,  $I_L$ 은 전류원 부하를 등가로 표시한 것이고, 병렬로 존재하는 임피던스는 무한대로 가정하여 고려하지 않았다. 또한 전원전압  $V_s$ 에는 기본파 정상성분만 있다고 가정했으므로 영상성분 전압은 없다.

$V_c$ 는 인버터에 의해 발생하는 전압이고, 지령값  $V_c^*$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$V_c^* = K_h(1 - G)I_L \quad (4)$$

이렇게  $V_c$  전압을 발생시켜주면 전원측 전류  $I_s$ 는 다음과 같다.

$$I_s = \frac{Z_z}{Z_s + Z_z + K_h(1 - G)} I_L \quad (5)$$

여기서  $G=1$  : 기본파일 때

0 : 고조파일때

여기서  $I_s$ 에  $I_L$ 의 고조파 성분이 나타나지 않게 하기 위해서 다음과 같은 요구조건을 만족해야 한다.

$$K_h \gg |Z_z| \quad (6)$$

부하측 전류  $I_L$ 이 전원측 전류  $I_s$ 에 미치는 영향을 알아보기 위해서 다음과 같이 식을 정리한다.

$$\frac{I_s}{I_L} = \frac{Z_z}{Z_s + Z_z + K_h(1 - G)} \quad (7)$$

위 전달함수를 MatLab을 이용해 보드선도를 그려 보면 그림 4와 같으며  $Z_z$ 는 0.06pu, 0.04pu, 0.02pu으로 하였다. 그림 4에서 보듯이 지그재그 변압기의 영상성분 임피던스가 좀 크더라도 기본파를 제외한 모든 고조파에서 게인이 -18dB 이하이므로 부하측에서 발생한 고조파 전류가 전원측으로 흐르지 못함을 알 수 있고, 그 전류는 지그재그 변압기를 통해 흐르게 된다.

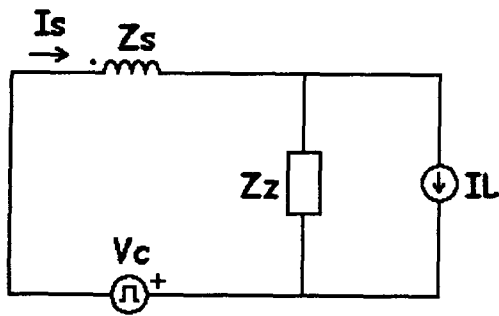


그림 3 전류원부하에서 전압제어방식의 영상성분 등가회로

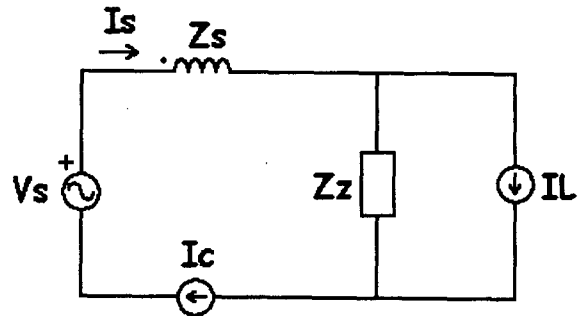


그림 5 전류원부하에서 전류제어방식의 영상성분 등가회로

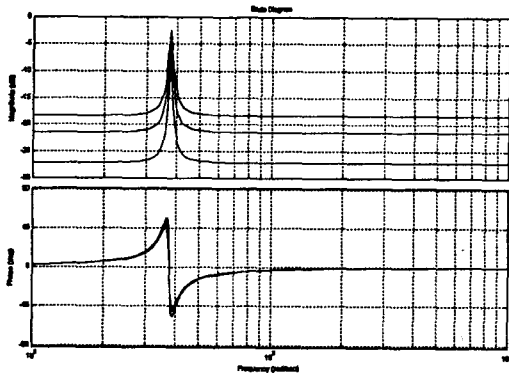


그림 4 그림 3의 보상특성 ( $Z_s=0.144\Omega$ ,  $\omega_0=377$ ,  $Q=6$ ,  $K=3$ )

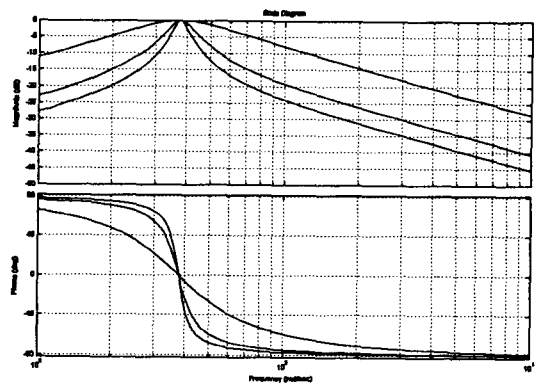


그림 6 그림 5의 보상특성

이렇게 지그재그 변압기로 유입되는 영상성분의 고조파 전류는 각상에 1/3씩 나뉘지며, 각상의 영상 성분 고조파를 감소시키는 역할을 하기도 한다.

b) 기본파 성분에 대한 전류제어

전류제어를 위한 그림 1의 영상성분 단상등가회로는 그림 5와 같다. 여기서  $I_c$ 는 인버터에 의해서 제어되는 전류이며, 이 전류의 지령치는 다음과 같다.

$$I_c^* = G \cdot I_L \quad (8)$$

이 전류제어는 부하의 불평형에 의해서 발생한 기본파 성분을 전원측으로 흐르게 하기 위한 것으로 지그재그 변압기로 기본파가 유입되어 과부하와 과보상이 발생하는 것을 방지한다.

부하전류가 전원측 전류에 미치는 영향을 알아보기 위해서 다음과 같이 식을 정리한다.

$$\frac{I_s}{I_L} = G(s) = \frac{\frac{\omega_0}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2}, \quad \omega_0 = 377, \quad Q=4$$

위 수식을 MatLab을 이용해 보드선도를 그리면 그림 6과 같다.

그림 6에서 보듯이 기본파에서 게인이 0dB 이므로 부하 불평형에 의해 발생한 기본파 성분이 전원측으로 모두 흐르며 지그재그 변압기로는 고조파만 흐름을 알 수 있다.

2.1.2 전압원 부하

a) 고조파 성분에 대한 전압제어

전압 제어를 위한 그림 1의 영상성분에 대한 단상등가회로는 그림 7과 같다. 그림 7에서  $Z_s$ 는 전원 임피던스,  $Z_z$ 는 지그재그 변압기 임피던스,  $V_L$ 은 전압원 부하를 등가로 표시한 것이고, 직렬로 존재하는 임피던스는 Zero로 가정하여 고려하지 않았다. 또한 전원  $V_s$ 에는 기본파 정상성분만 있다고 가정한다.  $V_c$ 는 인버터에 의해 발생하는 전압이고, 지령치  $V_c^*$ 는 다음과 같다.

$$V_c^* = K_h(1-G)I_s \quad (10)$$

이렇게  $V_c$  전압을 발생시켜 주면 전원측 전류  $I_s$ 는 다음과 같다.

$$I_s = \frac{1}{Z_z + K_h(1-G)} V_L \quad (11)$$

여기서 부하측 고조파 전압  $V_L$ 에 의해서 전원측에 고조파 전류가 나타나지 않게 하기위해 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

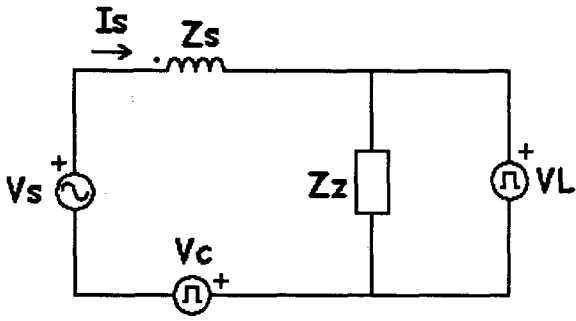


그림 7 전압원부하에서 전압제어방식의 영상성분 등가회로

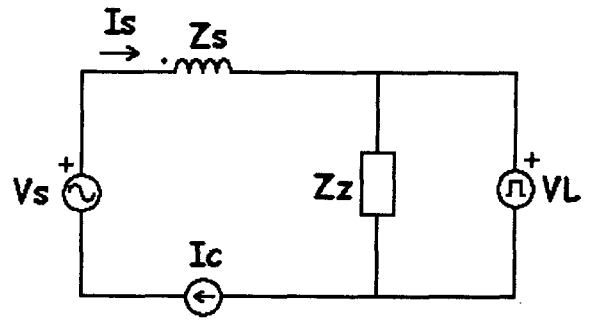


그림 9 전압원부하에서 전류제어방식의 영상성분 등가회로

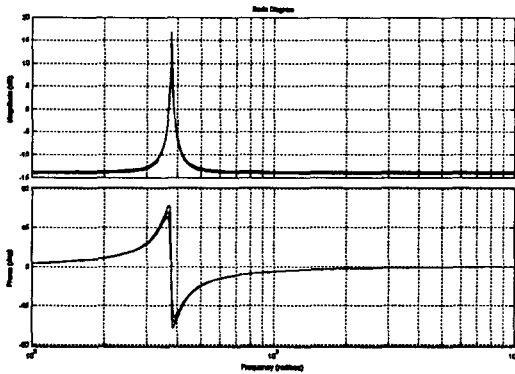


그림 8 그림 7의 보상특성

$$K \gg 1 \text{ pu or } Z_s \text{ larger} \quad (12)$$

부하측 전압  $V_L$ 이 전원측 전류  $I_s$ 에 미치는 영향을 알아보기 위해 다음과 같이 식을 정리한다.

$$\frac{I_s}{V_L} = \frac{1}{Z_s + K_h(1-G)} \quad (13)$$

위 전달함수를 MarLab을 이용해 보드선도를 그리면 그림 8과 같다 ( $Z_s=0.144$ ,  $Q=6$ ,  $K=7.2$ ). 그림 8에서 볼 수 있듯이 전원 임피던스가 변해도 부하측에서 발생한 고조파 전압에 의해 전원측으로 나타나는 전류가 극히 작음을 알 수 있다.

#### b) 기본파 성분에 대한 전류제어

전류제어를 위한 그림 1의 영상성분에 대한 단상등가회로는 그림 9와 같다. 여기서  $I_c$ 는 인버터에 의해서 제어되는 전류이며, 이 전류의 지령치는 수식 8과 같다. 그러므로 이 전류제어는 앞 2.1.1에서 전류제어와 동일하며 보상특성도 그림 6과 같다.

위 동작원리에서 전류원부하와 전압원부하에서 두가지 제어경우와 같이 전류제어는 부하 전류의 기본파 성분만을 흐를 수 있게 만들고, 전압제어는 부하 전류의 고조파 성분을 흐르지 못하게 만들어 줌으로서 전원측 중성선에 고조파 전류가 흐르지 않고, 기본파만 흐르며 또한 지그재그 변압기에 기본파가 유입되지 않으므로 과부하 및 상전류의 과보상을 막을 수 있다.

## 2.2 시뮬레이션

제안한 방식의 시뮬레이션에 사용된 시스템 정수는 다음과 같다.

- 전원 : 220V(상전압,실효값), 60Hz,  $L_s=0.35\text{mH}$
- 전압원 부하 : 50kVA, 커패시터와 저항부하를 갖는 3개의 단상 다이오드 정류기,  $C_a=C_b=C_c=3300\mu\text{F}$ ,  $R_a=6\Omega$ ,  $R_b=10\Omega$ ,  $R_c=10\Omega$ .
- 전류원 부하 : 50kVA, 인덕터와 저항부하를 갖는 3개의 단상 다이오드 정류기,  $L_a=L_b=L_c=100\text{mH}$ ,  $R_a=3\Omega$ ,  $R_b=5\Omega$ ,  $R_c=5\Omega$

그림 10은 전압원 부하이 고 불평형(UBF=30%)일 때 제안한 능동필터의 시뮬레이션 파형이다.

각상 부하전류  $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$  및  $i_{Lc}$ 의 실효값은 각각 88.7A, 56.7A 및 56.7A 이다. 부하측 중성선 전류  $i_{nL}$ 은 122.5A 이며 고조파의 영상성분뿐만 아니라 불평형에 의한 기본파의 영상성분도 포함한다. 전원측 임피던스가 지그재그 변압기의 영상성분 임피던스 보다 작기 때문에 인버터가 동작을 시작하기 전(즉, 바이패스 스위치가 닫혀 있을 때)에는 중성선 전류의 대부분이 전원측으로 흐르며, 지그재그 변압기 쪽으로는 적은 양만 흐르게 되어 이 지그재그 변압기만으로는 중성선 전류의 제거가 잘 되지 않고 있음을 알 수 있다.

그러나, 인버터가 동작을 시작하면 이 기본파 영상성분 전류는 인버터를 통해 전원측 중성선에 흐르게 되고, 이와 동시에 고조파 영상성분은 지그재그 변압기를 통해 흐르게 됨을 알 수 있다. 또한, 부하측 상전류  $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$  및  $i_{Lc}$ 의 THD는 각각 101.1%, 88.1% 및 111.7%이나 전원측에서는 각각 59.1%, 48.7%, 110.2%로 감소한다.

그림 11은 전류원 부하이 고 불평형(UBF=30%)일 때 제안한 능동필터의 시뮬레이션 파형이다. 전류원 부하에서도 전압원 부하에서와 마찬가지로 필터장치가 동작함에 따라 기본파 영상성분 전류는 인버터를 통해 전원측 중성선에 흐르고, 고조파 영상성분은 지그재그 변압기를 통해 흐를 수 있다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 방식은 전압원 부하와 전류원 부하에서 모두 잘 동작함을 알 수 있다.

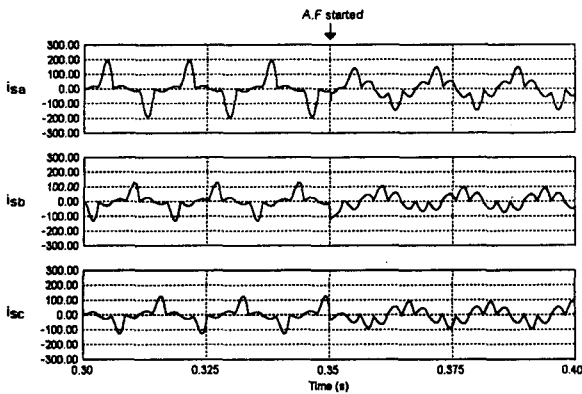


그림 10 전압원 부하에서 각부파형

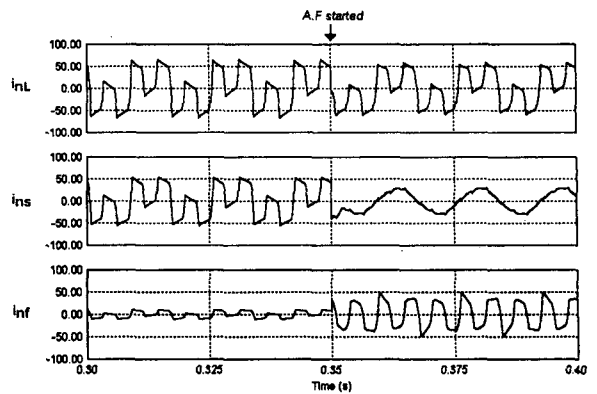


그림 11 전류원 부하에서 각부파형

### 3. 실험 결과

제한한 방식으로 필터장치의 시작품을 제작하였으며 본 실험에서 사용한 정수는 다음과 같다.

- 전원 : 220V(상전압, 실효값), 60Hz,  $L_s = 0.35\text{mH}$
- 부하 : 1kVA, 커패시터와 저항부하를 갖는 3개의 단상 다이오드 정류기.  
불평형 부하 :  $C_a = C_b = C_c = 3300\mu\text{F}$ ,  $R_a = 160\Omega$ ,  $R_b = 60\Omega$ ,  $R_c = 100\Omega$  (UBF=30%).
- 능동필터 : H-브리지 PWM 인버터, 필터 인덕터  $L_f = 1\text{mH}$ , 스위칭 주파수는  $f_{sw} = 20\text{kHz}$

그림 12는 UBF = 30%인 불평형 부하일 때 제한한 방식의 각 전류파형을 보여준다. 본 논문에서 50kVA 실험결과는 향후에 추가할 것이며, 실험 결과에서 볼 수 있듯이 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 3상 4선식 배전계통에서 중성선 전류를 제거하기 위한 저가형 능동전력필터가 제안되었으며 본 방식은 다음과 특징을 갖는다.

- 중성선 전류 제거특성이 시스템 임피던스에 영향을 받지 않으며 90%이상의 제거율을 나타낸다.
- 변압기를 낮은 영상성분 임피던스를 갖도록 특별히 설계할 필요가 없어 변압기의 크기가 작아진다.
- 인버터는 부하 불평형시 기본파 영상전류만을 보상하므로 부하용량대비 인버터정격이 매우 낮다.
- 스위칭소자와 센서 수가 적고 제어가 간단하다.
- 중성선 전류뿐만 아니라 입력전류의 3조파 성분이 제거되어 입력전류의 THD도 개선된다.

본 방식은 최근 3상 4선식 배전계통에서 발생하는 과도한 중성선전류 제거를 위한 저가형 능동필터로서 실용화 단계에 있다.

### 참고 문헌

- [1] T. M. Gruz, "A Survey of Neutral Current in Three-Phase Computer Power System," *IEEE Trans. on Ind. Appl.* vol. 26, no. 4, Jul/Aug.1990, pp. 719-725.
- [2] P.P. Khera, "Application of Zigzag Transformers for Reducing Harmonics in the Neutral Conductor of Low Voltage Distribution System," *IEEE IAS Conf. Rec.*, 1990, pp.1092.
- [3] C. A. Quinn, N.Mohan, "Active Filtering of Harmonic Currents in Three-Phase, Four-Wire Systems with

Three-Phase and Single-Phase Non-Linear Loads," in APEC 1992, pp. 829-835.

- [4] P. N. Enjeti, W. Shiren, "Analysis and Design of a New Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire Electric Distribution Systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 6, Nov./Dec. 1994, pp. 1565-1572.

- [5] P.T. Cheng, Y.F. Huang, C.C. Hou, A New Harmonic Suppression Scheme for Three-Phase Four-Wire Distribution Systems, *IEEE APEC 2001 Conf. Rec.*, pp.1287-1293.

- [6] 장민수, 최세완, 김기용, "3상 4선식 배전계통에서 중성선전류 제거를 위한 새로운 저가형 능동필터", 전력전자학회 논문지, 제7권, 제4호, pp. 359-365, 2002년 8월.

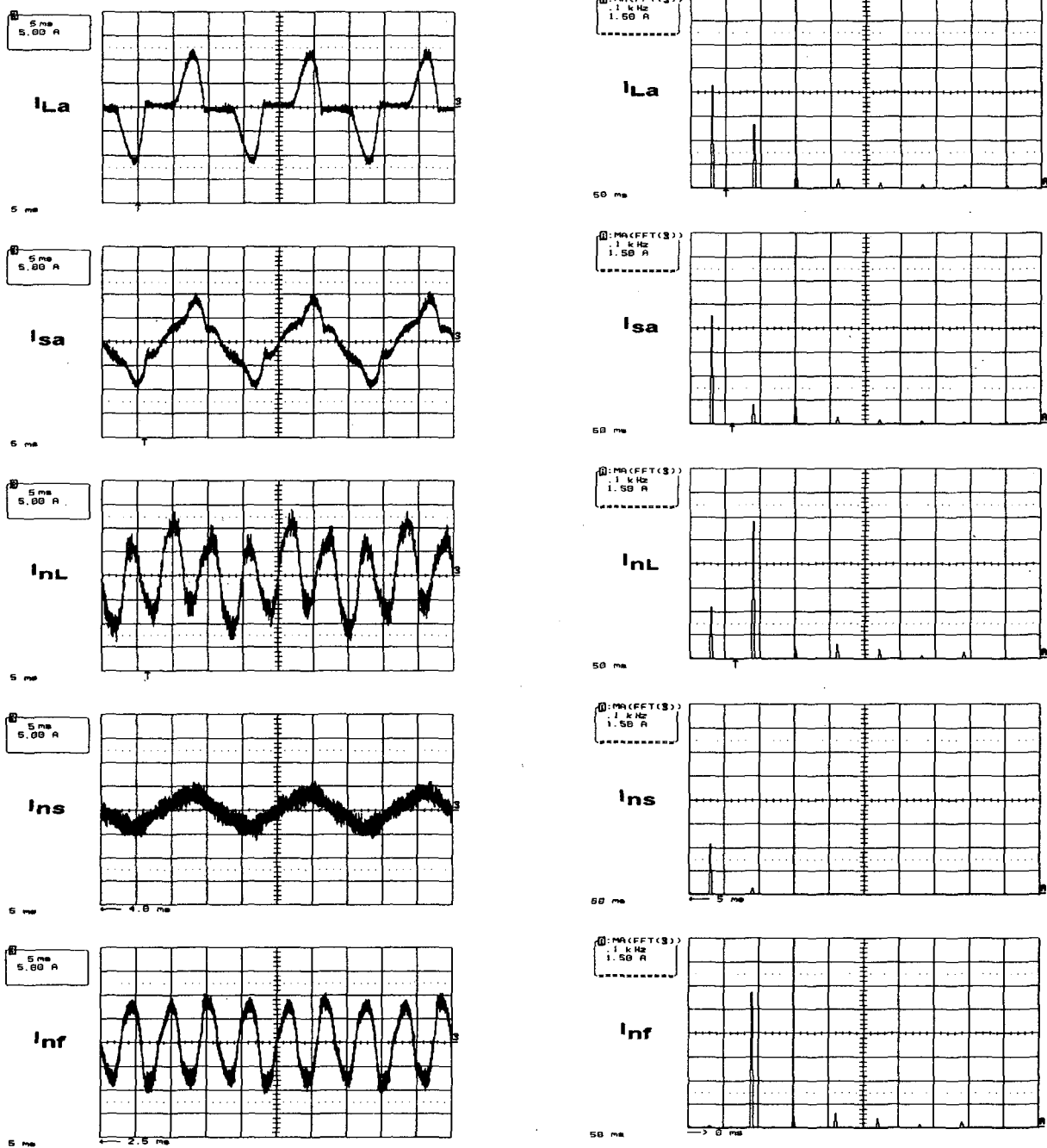


그림 12 부하불평형(UBF=30%)일 때 파형(5A/div, 5ms/div)과 주파수 스펙트럼(1.5A/div, 0.1kHz/div)